Vermessung hochalpiner Bergseen mittels moderner Technologien

DANIEL INNERHOFER[1], GOTTFRIED MANDLBURGER[2,3], FRANK STEINBACHER[4] & MARKUS AUFLEGER[1]

Zusammenfassung: Im Sommer 2017 fand eine Messkampagne im Tiroler Stubaital statt mit dem Ziel, verschiedene moderne Methoden der Gewässervermessung in Hinblick auf deren Anwendbarkeit im hochalpinen Bereich zu überprüfen, zu kombinieren und im Überlappungsbereich zu vergleichen. Die dabei verwendeten Messmethoden waren ein hochauflösendes Fächerecholot, Mehrmedienphotogrammetrie und bathymetrisches Flugzeuglaserscanning. Als Untersuchungsgebiet wurden zwei Seen in einer sehr exponierten Lage der Stubaier Alpen ausgewählt, der Grünausee (2328 müA) und die Blaue Lacke (2289 müA) im Bereich der Sulzenauhütte.

1 Einleitung

Die bathymetrische Erfassung von Gebirgsseen ist speziell für geomorphologische Fragestellungen von Bedeutung. Da solche Seen oft von relativ gesehen kurzer Lebendsauer sind oder, aufgrund hydrologischer und geologischer Prozesse, einem starken Wandel unterworfen sein können, bedarf es einer Vermessungsmethode die es erlaubt in kurzer Zeit die Gewässersohle zu erfassen und ggf. mehrere Messungen innerhalb eines kurzen Zeitraums durchzuführen. Für die Vermessung von Seen stehen im Allgemeinen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung. So hat sich in der Vergangenheit die Sonartechnik sehr stark weiterentwickelt und moderne Echolote erlauben es, großflächige Bereiche in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Aber auch andere Fernerkundungsmethoden wie das Airborne Laserscanning mit grünen Lasern und die Mehrmedienphotogrammetrie bieten diesen Vorteil und ermöglichen die Vermessung von sonst schwer zugänglichen Gewässern. Ziel der vorgestellten Untersuchung ist es, die Möglichkeit zur Anwendung und Kombination dieser Methoden zu überprüfen sowie die jeweiligen Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Spezielles Augenmerk wird dabei auf die Anwendung im hochalpinen Bereich, zur Vermessung von Gebirgsseen, gelegt. Die größten Herausforderungen, die sich dabei ergeben sind die schwierige Erreichbarkeit der Seen (u.U. Transport der Messausrüstung zu Fuß) und die klimatischen Bedingungen (kurze Zeitspannen mit günstigen Messbedingungen, starke Witterungsabhängigkeit und Temperaturschwankungen in den Bergen).

[1] Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, AB Wasserbau, Technikerstr. 13, A-6020 Innsbruck, E-Mail: daniel.innerhofer@uibk.ac.at
[2] Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: gottfried.mandlburger@ifp.uni-stuttgart.de
[3] TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Gußhausstraße 27-29/E120 A-1040 Wien
[4] AirborneHydroMapping GmbH, Feldstraße 1b, A–6020 Innsbruck, E-Mail: info@ahm.co.at

2 Datenerfassung

In diesem Abschnitt wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt und die durchgeführte Messkampagne (Echolot, Messflug) beschrieben. Die Datenerfassung erfolgte einerseits mittels Echolot (Abschnitt 2.3) und andererseits mittels Laserscanning und Luftbildauswertung (Abschnitt 2.4). Für letztere wurden photogrammetrische Passpunkte signalisiert und eingemessen (Abschnitt 2.2).

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet wurde unter dem Gesichtspunkt ausgewählt, dass es sich um ein wissenschaftliches Projekt handelt und somit möglichst aussagekräftige und übertragbare Ergebnisse geliefert werden sollen. Dazu wurden gewisse Anforderungen an die zu untersuchenden Bergseen gestellt: der See soll eindeutig alpinen Charakter haben, er soll trotzdem gut erreichbar sein und er muss für eine Befliegung geeignet sein (Sicherheitsaspekte beim Manövrieren im Gebirge). Des Weiteren sollte er nicht im direkten Einzugsgebiet eines Gletschers liegen, um einen fortlaufenden Eintrag von Schwebstoffen auszuschließen. Diese Kriterien werden von den Seen im Bereich der Sulzenau im Tiroler Stubaital erfüllt: dem Grünausee und der Blauen Lacke. Beide Seen liegen in wenigen Kilometern Entfernung zu einander auf rund 2.300 m Seehöhe, oberhalb der Sulzenauhütte, nahe des Alpenhauptkamms.

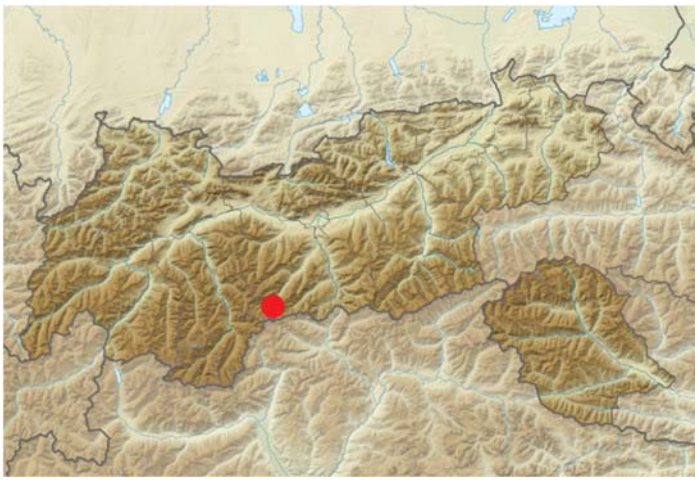

Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets in den Tiroler Alpen.

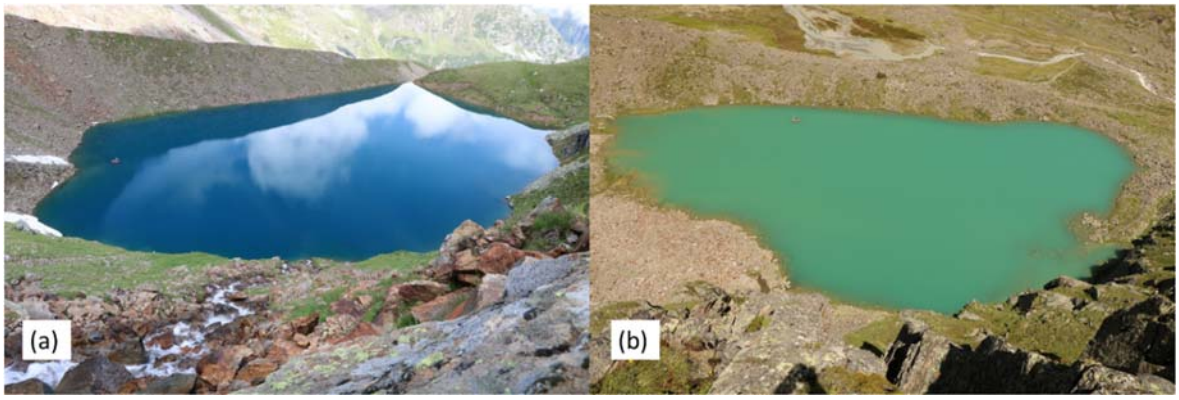

Abb. 2: Links der Grünausee mit Blick nach Süden und rechts die Blaue Lacke von Osten aus gesehen.

Bei beiden Seen handelt es sich um Moränenstauseen, die durch Ufermoränen vom Haupttal abgetrennt werden und somit außerhalb der derzeitigen Gletschervorfelder liegen (METZ 1977). Durch ihre räumliche Nähe war es möglich, mit relativ geringem Mehraufwand, zwei Seen mit unterschiedlicher Charakteristik zu vermessen. Während die Blaue Lacke oft noch eine deutlich sichtbare Trübung aufweist, hat der Grünausee meist klares Wasser (PATZEL 2008). Bei längerfristig günstigen Witterungsbedingungen, wie dies z.B. 2016 der Fall war, besteht auch für die Blaue Lacke Bodensicht bis zur maximalen Tiefe von ca. 12 m.
Abb. 3 gibt einen Überblick über das Untersuchungsgebietes und die vor Ort durchgeführten Vermessungsarbeiten.

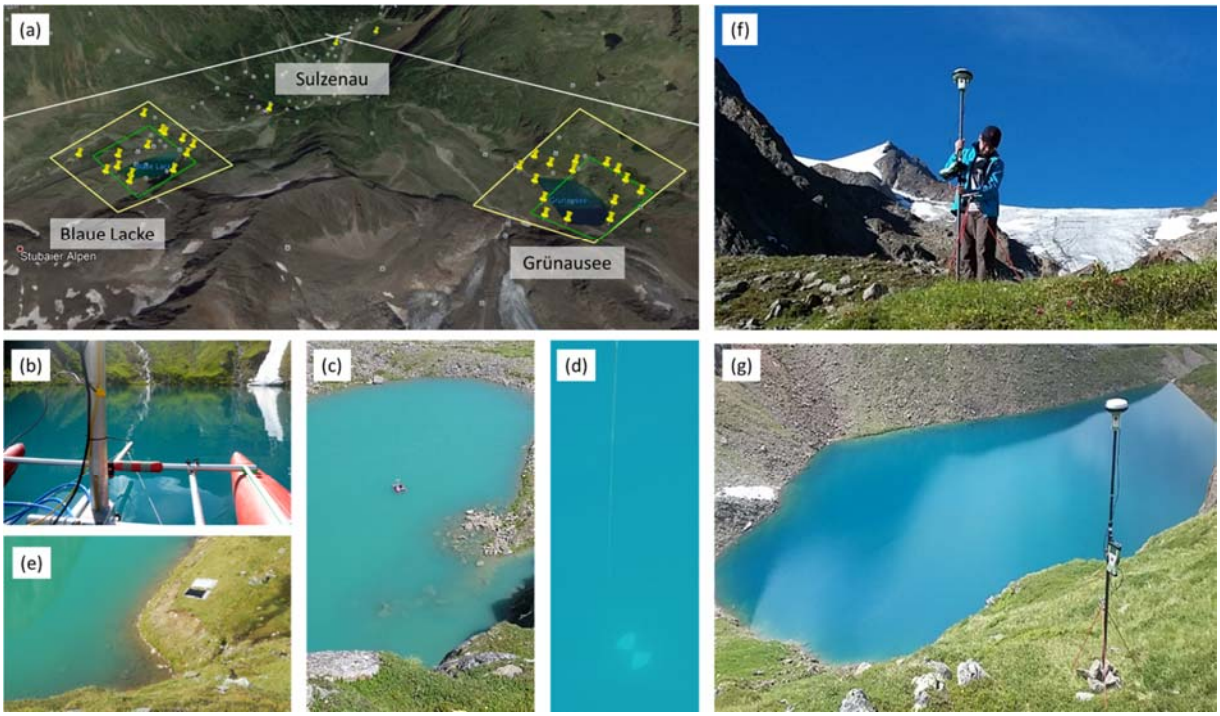

Abb. 3: Messkampagne Sulzenau: (a) Flugplanung und Passpunktanordnung, (b) Messboot im Einsatz (Grünausee), (c) Messboot vom Passpunkt 206 aus im Einsatz (Blaue Lacke), (d) Sichttiefenmessung Grünausee mit Secchi Scheibe, (e) radiometrische Kontrollflächen am Ufer des Grünausees, (f) Passpunktmessung beim Günausee, (g) Langzeitpasspunktbeobachtung Grünausee.

2.2 Passpunktmessung

Die Georeferenzierung der Luftbilder erfolgte anhand von photogrammetrischen Passpunkten. Abgestimmt auf die Größe der Bildpixel am Boden, die je nach Flughöhe 8-20 cm betrug, wurden zur Signalisierung quadratische weiße Zieltafeln mit einer Kantenlänge von 30 cm verwendet. Für jeden der beiden Seen wurden im Uferbereich jeweils zehn Passpunkte mittels in den Boden eingeschlagenen Steckeisen vermarkt. An diese wurde eine Gewindestange montiert und die Zieltafeln daran über eine zentrische Bohrung befestigt.
Die koordinative Einmessung erfolgte mit zwei Leica RTK GNSS Empfängern. Eine Antenne fungierte dabei als Basisstation, welche jeweils über einen gesamten Messtag betrieben wurde. Diese Langzeitbeobachtungen ermöglichte im Zusammenhang mit den Daten der naheliegenden

EPOSA Referenzstation Matrei in Tirol eine zentimetergenaue Koordinierung vor Ort. Die weiteren Passpunkte wurden mit einem Roverempfänger eingemessen, wobei die Beobachtungsdauer auch in diesem Fall zumindest 10-15 Minuten betrug. Die Auswertung der Koordinaten erfolgte einerseits in der Leica Software sowie mit der Open Source Programm RTKLIB[5]. Probleme bei der Datenauswertung ergaben sich vor allem durch Mehrwegeeffekte im Hochgebirge bzw. wegen der Abschattung durch die umliegenden Bergketten vor allem in südlicher Richtung. Trotz verhältnismäßig langer Beobachtungszeiten betrug die 3D-Puntklagegenauigket der photogrammetrischen Passpunkte lediglich 1-2 cm. Im Vergleich zur Bodenpixelgröße (8-20 cm) bzw. dem Laserfootprint (60 cm) ist dies aber dennoch eine Größenordnung genauer und daher als ausreichend zu betrachten.

2.3 Echolotaufnahme

Die Echolotung erfolgte am 11. + 12. Juli 2017 mit dem System GeoSwath Plus Compact der Firma Kongsberg. Dabei handelt es sich um ein hochauflösendes Fächerecholot, welches speziell für Flachwasseranwendungen konzipiert ist. Bei einem Fächerecholot wird aus dem empfangenen Echo des Schallimpulses (Ping) nicht nur die Entfernung sondern auch die Richtung bestimmt. Dadurch können mit einem Ping Punkte über die gesamt Fächerbreite gemessen werden. Das verwendete Gerät erreicht dabei eine Auflösung von bis zu 40 Punkten pro Meter Fächerweite. Die Vermessung des Sees erfolgt streifenweise, wobei die Messrichtung orthogonal zur Fahrtrichtung ist. So können mit parallelen Fahrwegen überlappenden Streifen aufgemessen werden.

Tab. 1: Gerätespezifikationen GeoSwath Plus Compact mit 500 kHz-Wandler (KONGSBERG 2018)

max. Reichweite unter Wandler	max. Fächerweite	max. Überdeckung am Seeboden	Tiefenauflösung	Öffnungswinkel (Horizontal)	Transmit Pulselänge	Ping Rate
50 m	190 m	bis zu 12x facher Wassertiefe	1,5 mm	0,5 °	32 bis 224 µs	bis 30 Hz

Das Messsystem bietet den Vorteil, dass es bei einem Gesamtgewicht von ca. 50 kg in mehrere Einheiten zerlegt werden kann. Als Trägersystem für das Echolot wurde ein Schlauchboot-Katamaran verwendet. Somit war es möglich, sowohl die Messausrüstung als auch das Boot soweit zu zerlegen und verpacken, dass die Teile jeweils von einer einzelnen Person , mit Hilfe einer Lastenkraxe, auch durch schwieriges Gelände transportiert werden konnten. Die Georeferenzierung während der Echolotung erfolgt über ein RTK-GNSS-System, wobei die benötigeten Korrekturdaten normaleweise über eine Ntrip-Verbindung von einem spezialisierten Datendienst abgerufen werden. Da jedoch im alpinen Gelände kein ausreichender Mobil-Funk-Empfang vorhanden war, musste für Zeit der Vermessung eine lokale Referenzstation installiert werden. Dazu wurde eine Trimble R8s Basistation in Sicht- und Funkreichweite der Seen über einem Fixpunkt aufgestellt und über Funk mit einem R10 Rover verbunden. Dieser konnte an die Prozessoreinheit des Echolots gekoppelt werden und ermöglichte somit den störungsfreien RTK-Betrieb. Dabei werden alle Daten des Wandlers und der Peripheriesysteme (GPS, Kompass, MRU, SVS) zeitsynchronisiert über die zentrale Recheneinheit erfasst und lokal gespeichert. Wichtig ist

[5] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning, http://www.rtklib.com/

ebenso die Erfassung der Temperatuverteilung, respektive der Schallausbreitungsgeschwindigkeit, über die Tiefe. Dazu wird mittels einer SVP-Sonde ein Schallgeschwindigkeitsprofil der Seen zum Messzeitpunkt aufgenommen.
Ein Punkt, der bei der bathymetrischen Vermessung mit dem Echolot zum Tragen kommt, ist der Zeitbedarf einer solchen Vermessung. Die Messung selbst kann bei einem See dieser Größe (Grünausee ca. 50.000 m²) innerhalb von zwei Stunden erfolgen. Nimmt man jedoch die benötigte Zeit für Auf- und Abbau der Messtechnik, Verladen und Transport hinzu, ergibt sich ein Zeitbedarf von bis zu eineinhalb Tagen pro See. Da es sich insgesamt um 350kg Ausrüstung handelt, die zu Fuß durchs Gelände transportiert werden müssen, sind auch entsprechende Anforderungen an das Personal gestellt.

Abb. 4: Echolotung des Grünausees.

2.4 Befliegung

Zur Vermessung des Seebodens mit den Mitteln der aktiven und passiven Fernerkundung wurde am 22.08.2017 eine Befliegung mit einem topo-bathymetrischen Laserscanner (Riegl VQ-880-G) sowie einer RGB Luftbildkamera (IGI H39) realisiert. Die Datenaufnahme wurde von der Firma AHM durchgeführt und war ursprünglich zeitgleich mit der Echolotkampagne geplant. Witterungsbedingt musste diese allerdings um fünf Wochen verschoben werden. Mehrere Starkregenereignisse Ende Juli und Anfang August 2017 führten allerdings zu einer verstärkten Trübung beider Seen. Während die Secchi Tiefe zum Zeitpunkt der Echolotkampagne beim Grünausee noch mehr als 10 m betrug und damit eine Gesamterfassung dieses Sees mittels Laserbathymetrie erlaubt hätte, wurde am Tag der Befliegung für beide Seen eine Secchi-Tiefe von ca. 2.5 m gemessen. Da jegliche optische Messmethode zur Bestimmung von Wassertiefe wesentlich durch die Gewässertrübung limitiert ist, konnte im konkreten Fall lediglich der Flachwasserbereich bis zu einer Tiefe von ca. 3.5 m erfasst werden. Dies entspricht der 1.5-fachen Secchi Tiefe und damit genau der Tiefenmessperformance des eingesetzten Lasersystems (RIEGL 2018).

Die prinzipielle Flugplanung ist in Abb. 3a dargestellt und erfolgte für beide Seen in getrennten Fluglinien aus dem jeweiligen Seitental, welche in Y-Form im Bereich des Sulzenau-Talbodens zusammen trafen. Die Erfassung stellte fliegerische Herausforderungen aufgrund der hochalpinen Lage, dem steilen Abfall des Geländes talauswärts und der komplexen Thermik dar. Daher erfolgte die Befliegung für jeden See in mehreren Fluglinien unterschiedlicher Höhe, beginnend bei einer Flughöhe von etwa 1000 m über Grund bis zu der Zielflughöhe von etwa 500 m über Grund. Für jeden See wurden derart drei Flugstreifen im sogenannten „terrain following mode", d.h. jeweils im Sinkflug talauswärts. Die Fluggeschwindigkeit betrug etwa 100 Knoten (ca. 50 m/s). Zur Stützung des Flugblocks wurden zwei Fluglinien quer über beide Seen aus entsprechend großer Flughöhe durchgeführt.

Der eingesetzte topo-bathymetrische Laserscanner weist eine Scanrate von 550 kHz auf. Die Strahldivergenz beträgt 1.1 mrad, was je nach Flughöhe zu einem Durchmesser des Laserabtastflecks am Boden zwischen 0.55-1.10 m entspricht. Obwohl die Punktdichte mit etwa 20 Punkten/m^2 im Einzelstreifen auch die Ableitung von Geländemodellen mit einer Rasterweite von etwa 25 cm ermöglicht hätte, ist die effektive räumliche Auflösung durch die Größe des Abtastflecks limitiert. Der Scanner zeichnet für jeden Laserpuls die gesamte Echowellenform auf. Diese wird einerseits für offline Analyse im post processing abgespeichert und andererseits online ausgewertet (PFENNIGBAUER et al. 2014).

Zeitgleich zu den Laserdaten wurden Luftbilder mit einer 39 MPix RGB Kamera aufgezeichnet. Der Sensor hat 7216 × 5412 Pixel und die Pixelgröße am Sensor beträgt 6.8 µm. Beim eingesetzten 35 mm Objektiv ergibt sich damit eine Pixelgröße am Boden (Ground Sampling Distance, GSD) von 10-20 cm. Das RGB Bildmaterial wurde für die Tiefenbestimmung durch Mehrmedienphotogrammetrie (MAAS 2015; MANDLBURGER 2018) und Analyse der Spektralinformation (LYZENGA et al. 2006) benutzt. Die Bilder einer ebenfalls auf der Plattform befindlichen Multispektralkamera mit Infrarotkanal wurden in dieser Untersuchung nicht verwendet.

3 Methoden

3.1 Echolot

Die Datenerfassung und –aufzeichnung erfolgt mit der von Kongsberg gelieferten Software wie in Kap. 2.3 beschrieben. Die Datenbearbeitung und –export erfolgen mit demselben Softwarepaket. Die Daten der einzelnen Peripheriesysteme werden von der Software im Zuge der Rohdatenprozessierung automatisch verschränkt. Dabei werden die aufgezeichneten Echos entsprechend der Temperaturverteilung und Schallausbreitung im Wasser korrigiert und mithilfe der GPS-Koordinaten und Lagedaten des Messbootes georeferenziert. In einem zweiten Schritt werden Filter aufgebracht um störende Echos aus der Wassersäule (z.B. Gasblasen) zu entfernen. Dazu wird sowohl der Bereich eingegrenzt aus dem Echos vom Boden erwartet werden sowie die Amplitude des Signals als Kriterium herangezogen. Die so erhaltenen Punktwolken können anschließend interpoliert und in ein Polygonnetz umgewandelt und exportiert werden.

Ein weiterer Vorteil des verwendeten Echolots liegt darin, dass auch die Amplitudenstärken des Echosignals ausgewertet werden können, entsprechend einer klassischen Sidescan-Auswertung. Durch entsprechende Schattierung der Ergebnisse erhält man somit einen guten Eindruck über die Morphologie der Gewässersohle (Kap. 4.1, Abbildung 6).

3.2 Laserbathymetrie

Die Laserdaten wurden einerseits mit der Herstellersoftware RiProcess und darüber hinaus mit der wissenschaftlichen Laserscanning Software OPALS (PFEIFER et al, 2014) prozessiert. Nach der initialen direkten Georeferenzierung in RiProcess wurde für den gesamten Flugblock eine Streifenausgleichung mit dynamischer Trajektorienkorrektur (GLIRA et al., 2016) durchgeführt. Die Standardabweichung der Höhendifferenzen gemessen in glatten Bereichen überlappender Flugstreifen betrug dabei nach der Streifenausgleichung 3.5 cm. Während bei mäßig bewegtem Gelände und einfacheren Flugbedingungen mit demselben Scanner in anderen Projekten auch bereits bessere Passgenauigkeiten von ca. 2 cm erreicht wurden, sind die Abweichungen angesichts des komplexen Geländes und der schwierigen Flugbedingungen mit der damit verbundenen verminderten Genauigkeit der Flugtrajektorie als zufriedenstellend zu betrachten.
Für die erforderliche Refraktions- und Laufzeitkorrektur wurde zunächst für jeden See getrennt ein Wasseroberflächenmodell nach dem statistischen Ansatz von MANDLBURGER et al. (2013) berechnet. Jeder Laserpuls im Wasserbereich wurde anschließend mit diesem Modell verschnitten und der wasserseitige Strahlverlauf entsprechend dem Brechungsgesetz von Snellius korrigiert (MAAS, 2015, MANDLBURGER, 2018a). Die korrigierten 3D-Punkte wurden anschließend mittels hierarchischer robuster Interpolation in Boden- und Nichtbodenpunkte klassifiziert und aus ersteren schließlich das DGM des Gewässerbodens sowie des umgebenden Geländes berechnet.

3.3 Bild-basierte Bathymetriebestimmung

Neben den Laserdaten wurden die RGB Bilder zur Tiefenbestimmung herangezogen. Dazu wurde der gesamte Bildblock in Agisoft Photoscan[6] und Pix4D Mapper[7] orientiert. Die absolute Georeferenzierung erfolgte dabei auf Basis der 22 mittels GNSS gemessenen Passpunkte. Der Rückprojektionsfehler belief sich dabei auf ca. 0.15 Pixel und die mittleren Abweichungen an den Passpunkten (RMS) betrugen 2 cm in der Lage und 4 cm in der Höhe.
Im Anschluss an die Aerotriangulation wurden mit dem Programmsystem SURE[8] mittels Dense Image Matching (DIM) eine dichte Punktwolke sowie ein DSM abgeleitet und darauf aufbauend ein True Orthophoto der beiden Seen berechnet. Da eine korrekte Bildzuordnung vor allem für tiefe Seebereiche nicht möglich war, wurde zur Rektifizierung der Luftbilder die Wasseroberfläche aus der Laservermessung in das DIM DEM integriert. Für den Flachwasserbereich hingegen ist eine bildbasierte Tiefenbestimmung möglich. Hierbei kamen zwei verschiedene Ansätze zur Anwendung: (i) Mehrmedienphotogrammetrie und (ii) Tiefenbestimmung aus spektraler Information. Beide Ansätze sind in MANDLBURGER (2018b) detailliert beschrieben. Die erforderlichen Arbeitsschritte werden daher im Folgenden nur grob skizziert.
Bei der Mehrmedienphotogrammtrie ist beim Vorwärtsschritt der Punkte des Gewässerbettes die Brechung an der Wasseroberfläche gemäß dem Snellius'schen Brechungsgesetzt zu berücksichtigen. Als Input werden (i) die unkorrigierten 3D-Objektpunkten, (ii) ein Wasseroberflächenmodell, (iii) der Brechungsindex von Wasser (~1.33) und (iv) für jeden Punkt die zugehörigen Bildpositionen, aus denen der Punkt vorwärtsgeschnitten wurde, benötigt. Mit diesen Informationen kann

[6] Webseite Agisoft: http://www.agisoft.com/
[7] Webseite Pix4D Mapper: https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software
[8] Webseite nFrames: https://www.nframes.com/

für jeden Punkt das scheinbare Strahlenbündel rekonstruiert werden. Jeder Bildstrahl wird dann mit der Wasseroberfläche verschnitten (ray tracing) und die Richtung des, aufgrund der Strahlbrechung beim Übergang in das optisch dichtere Medium Wasser, zum Lot hin abgelenkten Bildstrahls bestimmt. Alle wasserseitigen Bildstrahlen werden dann erneut vorwärtsgeschnitten, wobei bei mehr als 3 Bildstrahlen die 3D Position des Gewässerbodenpunktes mittels vermittelnder Ausgleichung bestimmt wird. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Textur durch Streueffekte und Signalabsorption im Wasser mit zunehmender Tiefe je nach Trübungsgrad abnimmt. Durch die beträchtliche Trübung zum Zeitpunkt der Luftbildaufnahme konnten im gegenständlichen Fall Wassertiefen nur bis zu einer Tiefe von ca. 2 m zuverlässig bestimmt werden. Die homogene Textur der bewuchsfreien hochalpinen Seen verringerte die erzielbare Eindringtiefe zusätzlich.
Alternativ können Gewässertiefen auch aus der multispektralen Bildinformation gewonnen werden (LYZENGA et al. 2006). Dabei wird für jedes Orthophotopixel eine radiometrische Maßzahl ermittelt, wobei zumeist ein logarithmiertes Verhältnis zweier Bänder zur Anwendung kommt. Anhand von Referenzdaten, die punktuell aus den Fächerecholotdaten extrahiert wurden, wird anschließend der Zusammenhang zwischen Tiefe und radiometrischer Maßzahl gebildet. Im konkreten Fall erwies sich ln(grün/rot) als optimale Maßzahl für die lineare und quadratische Regression. Die ermittelten Parameter der Regressionsfunktion wurden anschließend auf alle benetzten Orthophotopixel angewandt und somit ein flächenhaftes Rastermodell des Gewässerbodens mit einer Gitterweite von 1xGSD (10 cm) berechnet. Ergebnisse

3.4 Echolotung

Die Echolotung liefert eine sehr detaillierte Bathymetrie der Gewässersohle. Durch die erwähnte, hohe Punktdichte (bis zu 400 Punkte pro m²) sind auch kleinräumige Strukturen gut erkennbar.

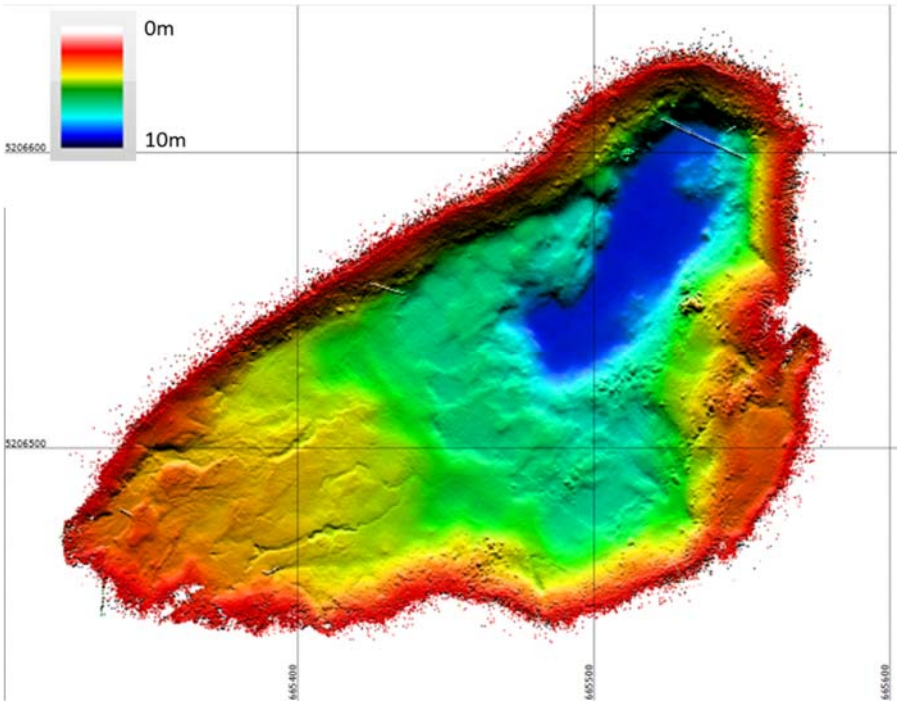

Abb. 5: Blaue Lacke: über die Tiefe farbkodiertes DGM, erstellt aus der Echolotdaten mit einer Rasterauflösung von 50 × 50 cm. Die max. Tiefe lag bei ca. 10 m.

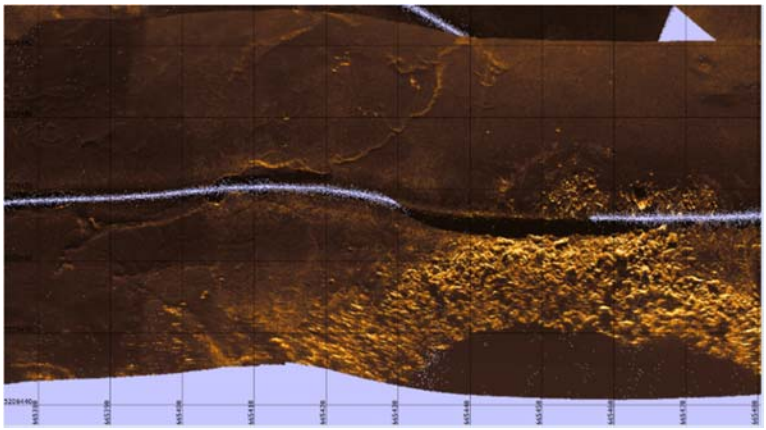

Abb. 6: Hochaufgelöstes Sidescan-Sonar Bild des südlichen Uferbereichs der Blauen Lacke. Die Auswertung der Sidescan-Daten liefert eine sehr detaillierte Morphologie. Starke Reflektoren (z.B. Steine) sind hell dargestellt. Pixelgröße 10 × 10 cm.

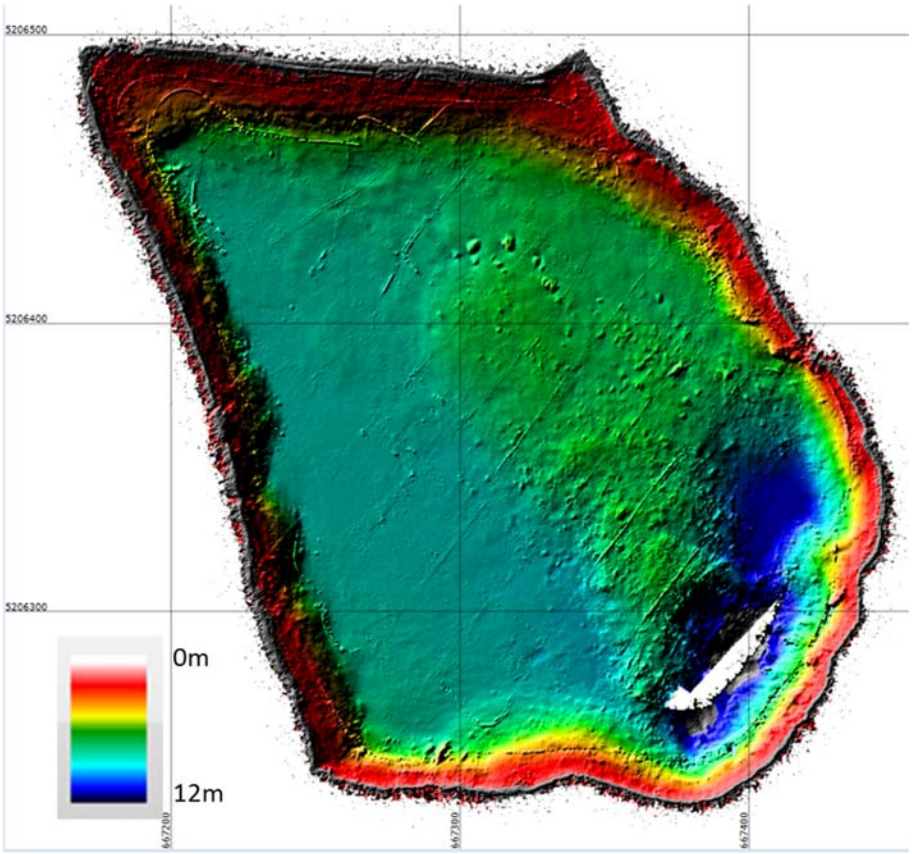

Abb. 7: Grünausee: über die Tiefe farbkodiertes DGM, erstellt aus der Echolotdaten mit einer Rasterauflösung von 50 × 50 cm. Die max. Tiefe lag bei ca. 12 m.

Die Begutachtung der einzelnen Streifen zeigt jedoch, dass es noch gewisse Abweichungen zwischen den Streifen gibt Abb. 7. Diese Differenz ist in den Randbereichen größer, beispielhaft hier dargestellt für zwei Streifen ergibt sich dort eine Abweichung bis zu 16 cm in der Höhe in den

mittleren Bereichen gibt es Abweichungen von rund 4 cm. Diese Differenz kann mehrerlei Ursachen haben, z.B. schnelle Bewegungen des Messboots (Kurvenfahrten, Wellenschlag), Abweichungen in der Referenzierung und Ausrichtung der einzelnen Sensoren zueinander, Übertragen von Ungenauigkeiten der Positionsbestimmung mittels GNSS oder wie hier am wahrscheinlichsten eine nicht vollständige Korrektur der veränderten Schallausbreitung über die Wassertiefe. Betrachtet man die Gesamtheit der Punkte der einzelnen Streifen ergibt sich eine Standardabweichung für den Lagefehler von 11 cm. Dieser Wert reduziert sich für die gesamte Punktwolke dadurch weiter, dass die Randbereiche von mehreren Streifen abgedeckt werden und so über eine Vielzahl von Punkten interpoliert wird. Für das dargestellte Beispiel der Blauen Lacke (ca. 24.000 m²) ergeben sich für die bereinigte Punktwolke ca. 5.000.000 Bodenpunkte mit einer Standardabweichung von ca. 9 cm. Durch Feintuning der Kalibrierwerte (z.B. für die Winkelabweichung des Messsystems) ist eine weitere Verringerung dieser Abweichung möglich.

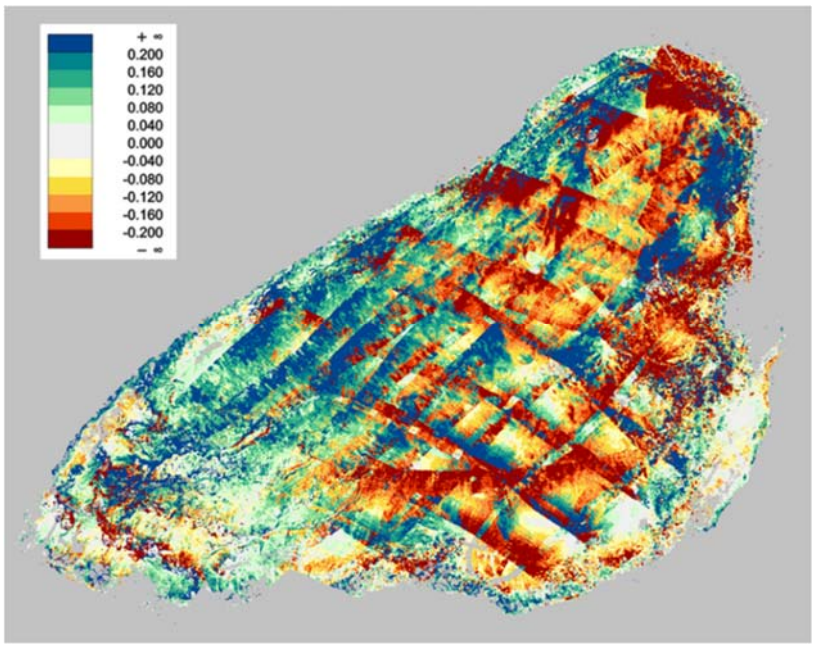

Abb. 8: Streifenabgleich der Echolotdaten der Blauen Lacke, mit Farbkodierung der Höhenabweichung [m]

3.5 Laserbathymetrie

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Tiefenbestimmung mittels optischer Fernerkundung präsentiert. Wegen des hohen Trübungsgrades beider Seen konnten dabei nur die Flachwasserbereiche erfasst werden. Exemplarisch werden die Ergebnisse daher anhand des südwestlichen Endes der Blauen Lacke dargestellt, welches einen flachen Uferbereich aufweist und damit eine entsprechend große Fläche mit Wassertiefen bis maximal 3.5 m.

Abb. 9 zeigt im benetzten Bereich die aus den Laserdaten ermittelte Gewässertiefenkarte soweit eine Durchdringung bis zum Grund möglich war und das digitale Orthophoto im restlichen Seebereich. An Land ist die Schummerung des Laser DGMs dargestellt. Man erkennt deutlich, dass

der Gewässerboden bis zur maximalen Penetrationstiefe konsistent dargestellt ist und morphologische Details (Rinnen, Blöcke, etc.) in den Unterwasser-Laserdaten abgebildet sind. Ein quantitativer Vergleich zu den Echolotdaten als Referenz findet sich in Abschnitt 3.7.

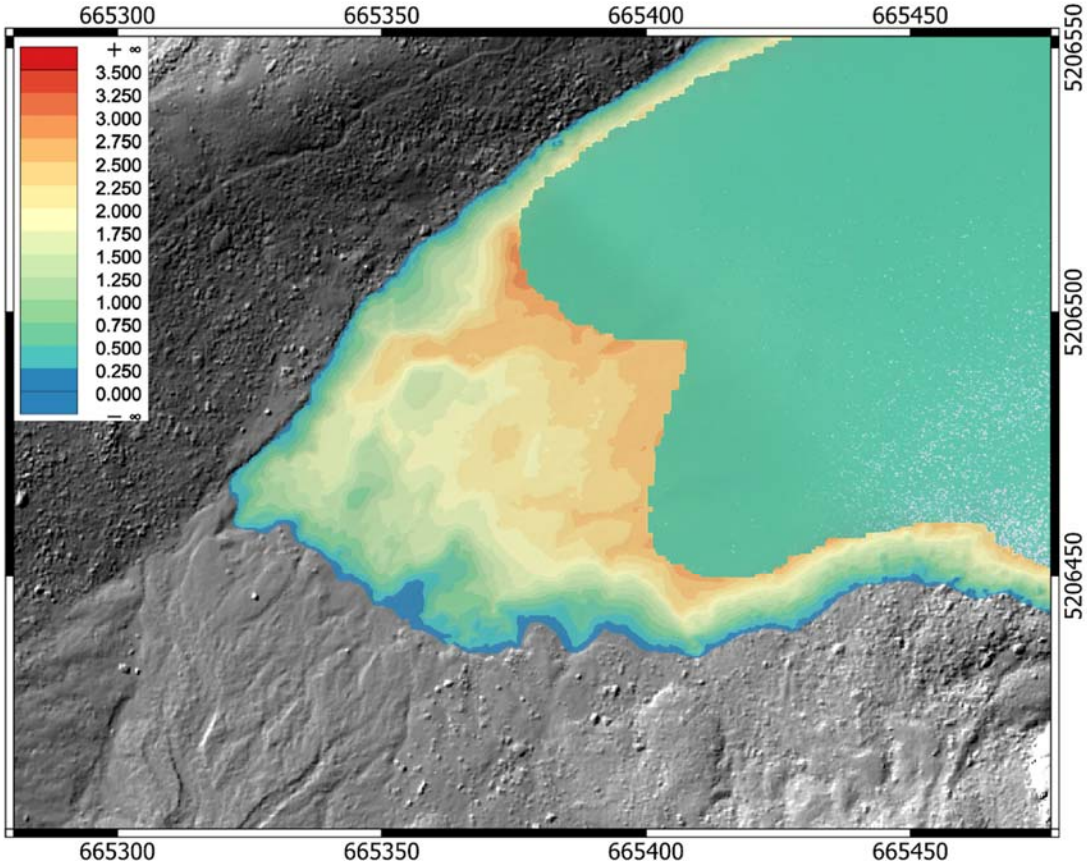

Abb. 9: Blaue Lacke: Seebereich: Wassertiefenkarte in [m] ermittelt aus 3D Laserpunktwolke und digitales Orthophoto in Bereichen außerhalb der maximalen Penetrationstiefe; Uferbereich: Schummerung Laser DGM

3.6 Bathymetrie aus Bilddaten

Abbildung 10 zeigt das digitale Orthophoto, welches als Nebenprodukt des Dense Image Matching entstanden ist. Das Orthophoto veranschaulicht die relativ hohe Gewässertrübung der Blauen Lacke zum Zeitpunkt der Datenerfassung. Gewässerbodenstrukturen, welche die Grundvoraussetzung für photogrammetrische Punktbestimmung ist, sind lediglich im ufernahmen Flachwasserbereich zu erkennen. Dem entsprechend eingeschränkt ist die erzielbare Messtiefe, die bei den gegebenen Umständen wesentlich geringer ist als jene der Laserbathymetrie. Im südöstlichen Bildbereich sind darüber hinaus auch Schlaglichter (sun glint) zu erkennen. Zur Vermeidung von Schlaglichtern wäre eine Befliegung bei tieferem Sonnenstand (z.B. in den Morgen- oder Abendstunden) vorteilhafter gewesen. Wegen der umgebenden steilen Berghänge hätte dies aber Schatten der Felswände im See zur Folge gehabt, weswegen die Schlaglichter in Kauf genommen wurden.
Abb. 11 zeigt eine Perspektivansicht der mittels Mehrmedienphotogrammetrie ermittelten 3D Punktwolke. Die Profilansicht der Abb. 11 unten ist zu entnehmen, dass der Gewässerbereich nur

in der Flachwasserzone bis zu einer Tiefe von ca. 1-1.5 m zuverlässig erfasst ist. Darüber hinaus nehmen zwischen 1.5-2.5 m Wassertiefe zunächst Ausreißerpunkte mit grob falschen Höhen zu. Bei noch größerer Tiefe können mangels Textur keine Punkte mehr bestimmt werden. Dies verdeutlicht klar die Einschränkungen des Verfahrens, welches neben glatter Wasseroberfläche und klarem Wasser auch genügend Bodentextur erfordert. Verfahrensbedingt ist die maximale Eindringtiefe bei der Mehrmedienphotogrammetrie kleiner der einfachen Secchi-Tiefe.

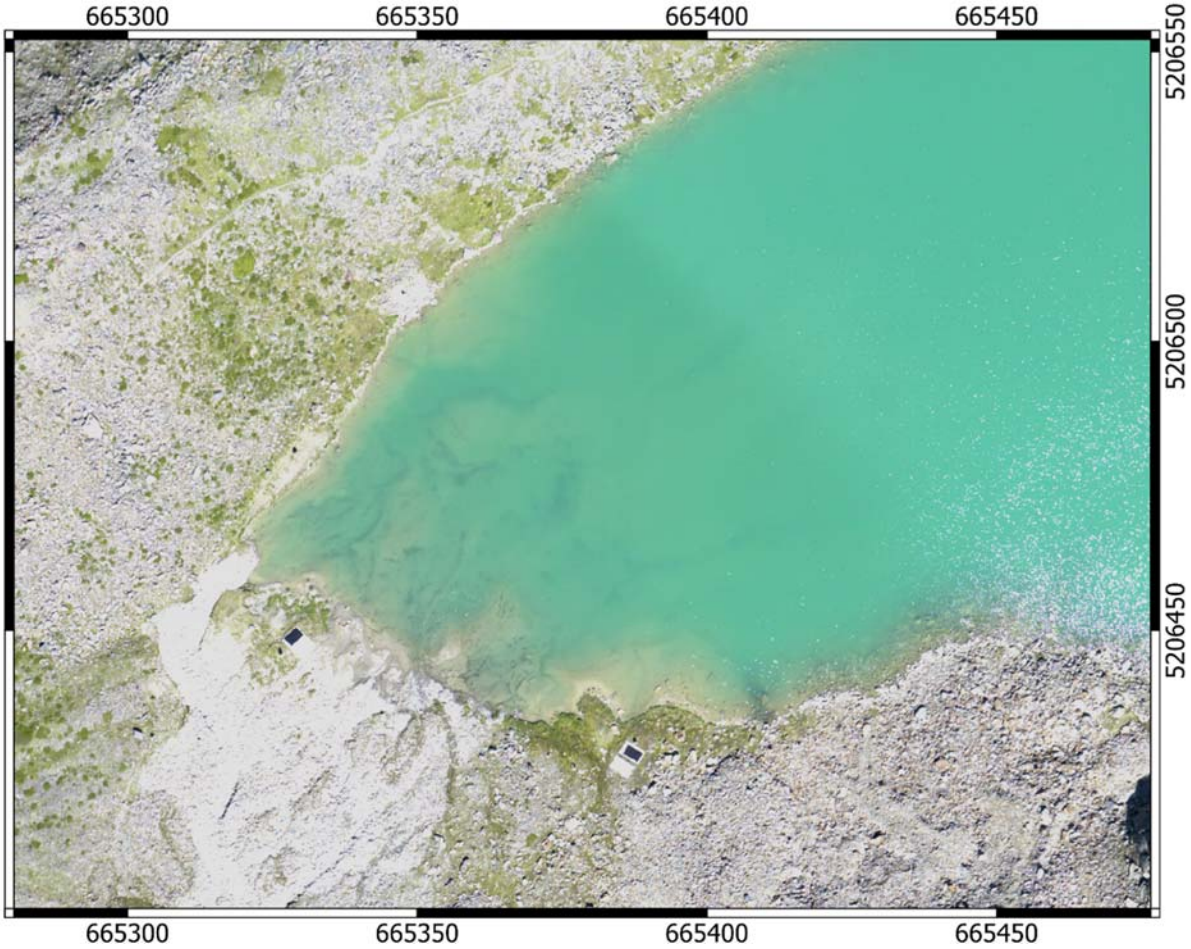

Abb. 10: Blaue Lacke: Digitales True Orthophoto

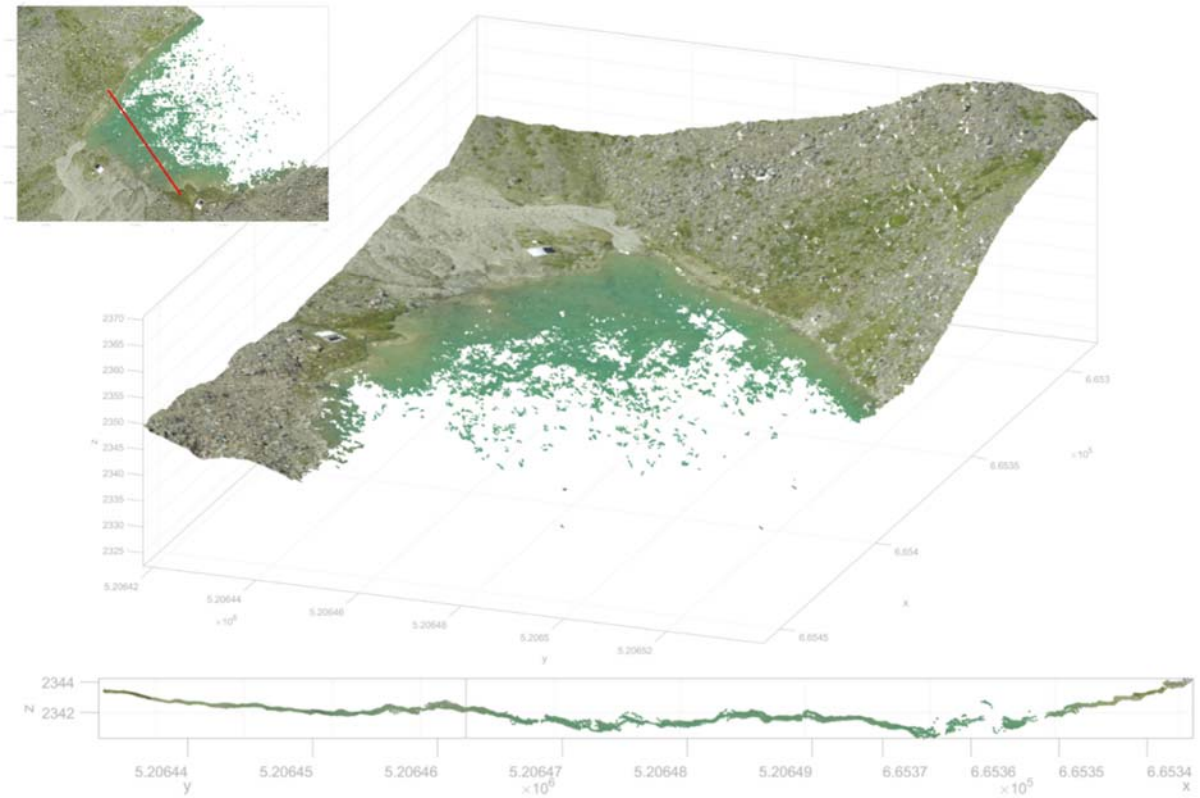

Abb.11: Blaue Lacke: Perspektivansicht der 3D Punktwolke aus Mehrmedienphotogrammetrie (oben) und Profilschnitt (unten), Lage des Profilschnitts in der Grundrissansicht (links oben).

In Abb. 12 sind der Ablauf der radiometrischen Tiefenbestimmung (a+b), die resultierende Tiefenkarte (c) und der Vergleich mit den Fächerecholotdaten als Referenz (d) dargestellt. Abb. 12a zeigt die ausgewählten Echolotprofillinien farbkodiert über dem digitalen RGB Orthophoto. Anhand dieser Referenzinformation wurde die Regressionsfunktion gegenüber der radiometrischen Größe x=log(rot/grün) durchgeführt, deren Ergebnis Abb. 12b zeigt. Bemerkenswerterweise hat sich der rote Kanal als sehr informativ herausgestellt, obwohl in diesem Wellenlängenbereich bereits eine starke Absorption in der Wassersäule gegeben ist. Der logarithmierte Quotient mit dem Grünkanal, welcher eine relativ geringe Absorption in der Wassersäule erfährt, führt zu einem starken funktionalen Zusammenhang zwischen Radiometrie und Tiefe. Im Vergleich zum Laserbodenmodell (Abb. 9) sind in der resultierenden Tiefenkarte der Abb. 12c ähnliche Strukturen zu erkennen. Die relativ gute Übereinstimmung mit den im konkreten Fall auch flächenhaft vorliegenden Fächerecholotdaten bestätigt das Histogramm der Resthöhenfehler der Abb. 12d. Die mittlere Abweichung liegt bei 2 mm und die robust abgeschätzte Standardabweichung (σ_{MAD}) beträgt 22 cm, was umgerechnet auf die Wassertiefe einen relativen Fehler von etwa 5% bedeutet. Dies stellt für radiometrische Tiefenbestimmung einen sehr guten Wert dar. Die Eindringtiefe ist aber auch hier mit etwa 4 m begrenzt, was aber immerhin größer als die Sichttiefe ist.

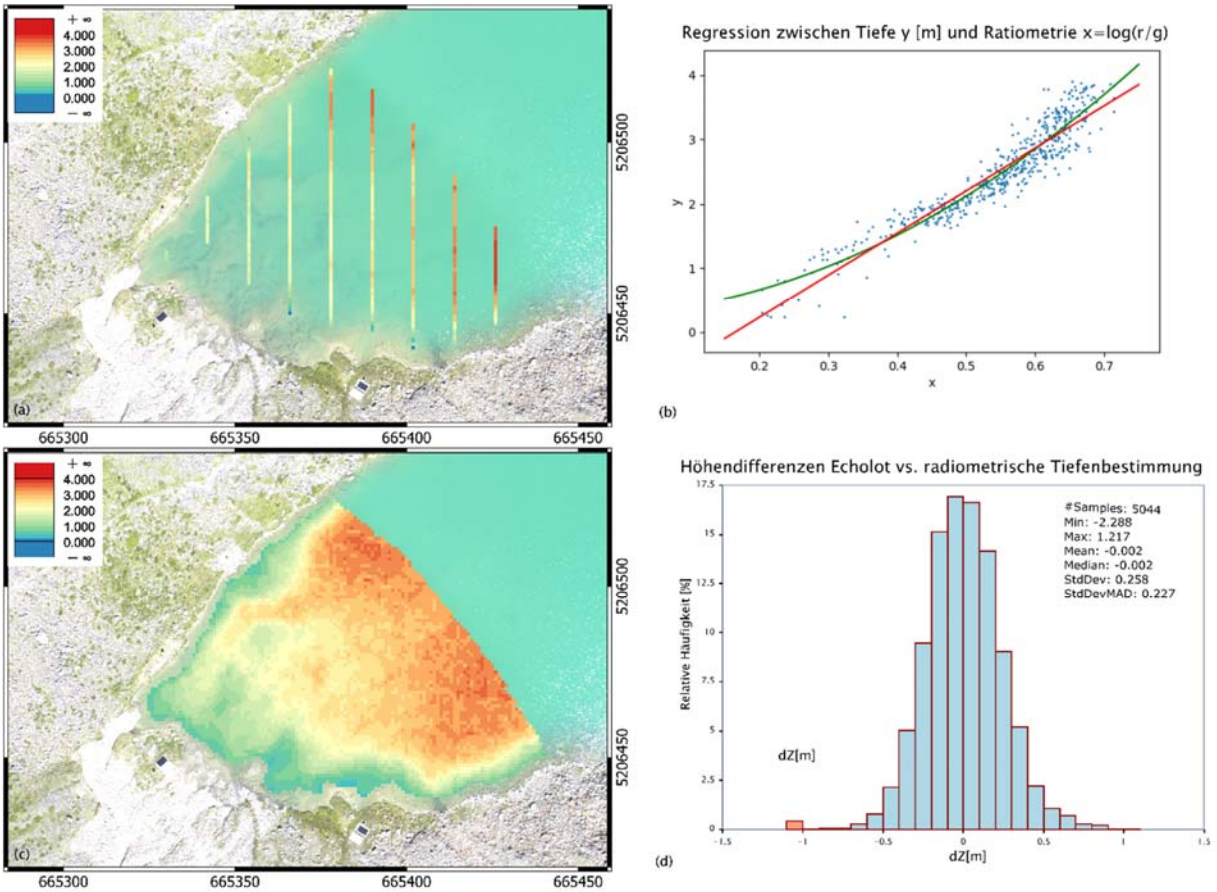

Abb. 12: Tiefenbestimmung aus multispektralen Bildern; (a) Digitales RGB Orthophoto und Referenzdaten, (b) Regression: Tiefe zu radiometrischer Messgröße, (c) Tiefenkarte ermittelt aus Bildradiometrie, (d) Histogramm der Höhenabweichung zwischen Fächerecholot und radiometrisch bestimmter Tiefe.

3.7 Vergleich der Methoden

Während die Gewässertiefen in Abb. 12c verfahrensbedingt gut zu den Echolotdaten passen, da diese im Zuge der Kalibrierung als Referenz eingefügt wurden, stellt der in Abb. 13 dargestellte Soll-Ist-Vergleich zwischen den Tiefen aus der Sonar- bzw. Laservermessung einen unabhängigen Vergleich dar. Abb. 13a zeigt dabei die farbkodierten Höhendifferenzen der beiden Verfahren in einer Skala von -25 cm (rot) bis +25 cm (blau) in 5 cm Schritten. Große Teile des Überlappungsbereichs weisen dabei einen weißlichen Farbton auf, welcher geringe Differenzen kleiner 5 cm kennzeichnet. Die größten Differenzen treten dabei im Uferbereich auf, wo die Echolotvermessung Tiefen lediglich von schleifende Echos in den flachen Randbereich hinein liefert. Diese sind verfahrensbedingt weniger zuverlässig als die tieferen Bereiche in der Seemitte. Laserbathymetrie hat hier bei der Verwendung von Scannern mit sehr kurzer Pulslänge den Vorteil eines praktisch nahtlosen Übergangs zwischen Wasser und Land. Die quantitative Auswertung ist im Histogramm der Abb. 13b zusammengefasst. Die Verteilung der Höhenabweichungen ist annähernd symmetrisch um Null (Median: +3 mm, Mittelwert: -4 mm) und die Standardabweichung beträgt 9.3 cm. Die robuste Standardabweichung (σ_{MAD}) ist mit 6 cm noch günstiger und belegt eine gute generelle Übereinstimmung der unabhängig erfassten Tiefen im Überlappungsbereich.

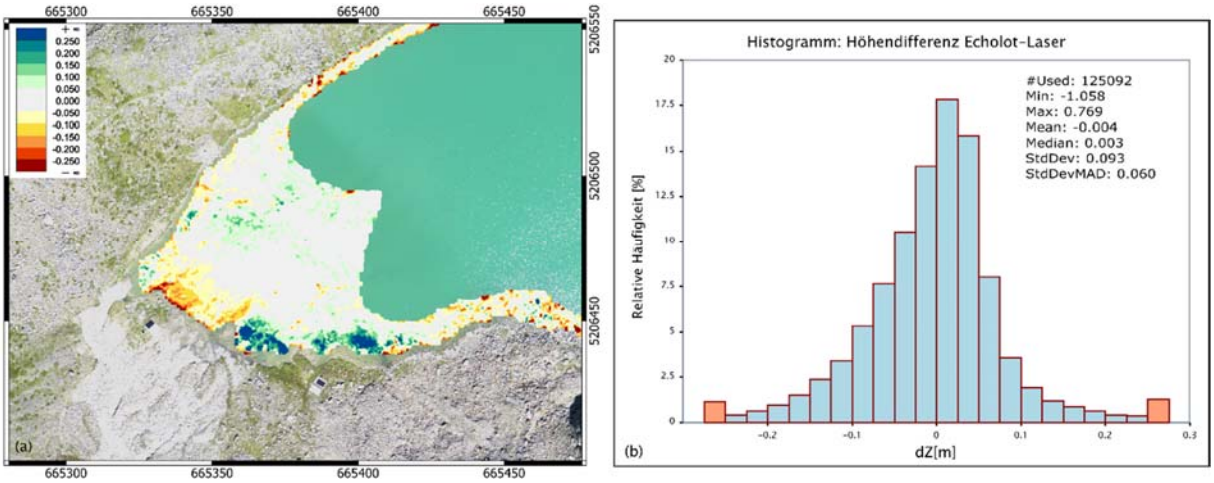

Abb. 13: Vergleich Echolot vs. Laserbathymetrie, (a) Farbkodierte Höhendifferenzen, (b) Histogramm der Soll-Ist-Höhenabweichungen.

4 Diskussion

Die Vermessung mittels Echolot lieferte sehr gute Ergebnisse und ein detailliertes Bild der Gewässersohlen und ihrer Morphologie. Gleichzeitig war es aber die Methode, die vor Ort den größten Personal- und Zeitaufwand erforderte, da die gesamte Ausrüstung teils weite Strecken zu Fuß getragen werden musste. Der mangelnde Mobil-Funk-Empfang stellt ein zusätzliches Problem bei Verwendung eines RTK-Systems dar und macht die Verwendung von lokalen Festpunkten notwendig. Durch die flugzeugbasierte Datenerfassung konnte ein lückenloser Datensatz im Ufer- und Flachwasserbereich erstellt werden. Das ursprüngliche Ziel einer großflächigen Erfassung mit den Mitteln der aktiven und passiven optischen Fernerkundung konnte aber aufgrund der äußeren Bedingungen (Gewässertrübheit) nicht erzielt werden. Als Erkenntnis bleibt die Feststellung, dass die Vermessung von hoch alpinen Seen mit der klassischen Echolotvermessung zwar aufwändig, aber weniger anfällig hinsichtlich der äußeren Bedingungen ist. Laserbathymetrie und Mehrmedienphotogrammetrie stellen dagegen für einen großflächigen Einsatz höhere Anforderungen an die äußeren Bedingungen wie Flugwetter und Transparenz des Wasserkörpers.

5 Danksagung

Der Beitrag von Gottfried Mandlburger wurde durch Mittel der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojektes „Bathymetrievermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ unterstützt.

6 Literaturverzeichnis

GLIRA, P., PFEIFER, N. & MANDLBURGER, G., 2016: Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **82**(12), 945-954.

KONGSBERG, 2018: Datenblatt GeoSwath Plus. www.km.kongsberg.com/geoacoustics, letzter Zugriff: 20.12.2018.

LYZENGA, DAVID R., MALINAS, NORMAN P. & TANIS, FRED J., 2006: Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **44**(8), 2251-59.

MAAS, H.-G., 2015: On the Accuracy Potential in Underwater/ Multimedia Photogrammetry. Sensors, **15**(8), 18140-18152.

MANDLBURGER, G., 2018a: A Case Study on Through-Water Dense Image Matching. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., **42**(2), 659-666.

MANDLBURGER, G., 2018b: Gewässervermessung mittels aktiver und passiver optischer Fernerkundung. Vermessung & Geoinformation, **3**, 195-206.

METZ, B., 1977: Geomorphologische Untersuchungen zur Unterscheidung zwischen Eisrand- und Moränenstauseen. Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau, **67**, 203-215.

PATZELT, G., 2008: Sammelbericht über die Gletschermessungen des Oesterreichischen Alpenvereins im Jahr 2007 (Gletscherbericht 2006/2007). Bergauf, 02/2008, 26-32.

PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W., 2014. OPALS – a framework for Airborne Laser Scanning data analysis. Computers, Environment and Urban Systems, **45**, 125-136.

PFENNIGBAUER, M., WOLF, C., WEINKOPF, J., & ULLRICH, A. (2014). Online waveform processing for demanding target situations. In: Proceedings SPIE Proceedings 9080, 1-10, https://doi.org/10.1117/12.2052994.

RIEGL, 2018: Datenblatt VQ-880-G. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf, letzter Zugriff: 20.12.2018.